

氏 名	東 亮一
学 位 の 種 類	博士 (工学)
学 位 記 番 号	博甲第 772 号
学位授与の日付	平成 17 年 9 月 30 日
学位授与の要件	課程博士 (学位規則第 4 条第 1 項)
学位授与の題目	磁化プラズマ中における電界センサに関する研究
論文審査委員 (主査)	長野 勇 (自然科学研究科・教授)
論文審査委員 (副査)	村本 健一郎 (自然科学研究科・教授), 上杉 喜彦 (自然科学研究科・教授), 八木谷 聡 (自然科学研究科・助教授), 笠原 禎也 (総合メディア基盤センター・助教授)

Abstract

Characteristics of a wire antenna used for the electric field observation in the magnetized space plasma could be different from those in free space because of the plasma sheath surrounding the antenna. We need to know the antenna characteristics (antenna impedance and effective length) in the magnetized plasma to calibrate the observed data and obtain the absolute intensity of the electric field.

We have estimated the effective lengths of antennas onboard Akebono satellites. The effective lengths of the two wire antennas onboard the Akebono satellite are also nearly equal to those in free space. Again, we see a variation depending on the satellite spin angle.

Next, we estimate capacitance component of the impedance of the two wire antennas onboard Akebono with assuming that the effective length is constant, and discuss the dependence of estimated impedance on the satellite spin angle.

At last, we measured the antenna impedance by using VIP instrument onboard the Akebono satellite. The impedance also depended on the satellite spin angle, and the dependence on the angle between the antenna and traveling direction of the Akebono satellite was seen. However the fluctuation range of measured impedance was very smaller than the fluctuation of estimated impedance.

In this study, we see a small variation depending on the impedance between the wake by the flowing plasma. However we was not found the cause of the variation depending on the estimated effective length between the satellite spin angle.

1 序論

太陽は膨大なエネルギーを光や紫外線、赤外線などの電磁波として常に宇宙空間に放射しており、この電磁波のエネルギーが地球大気の構造を決定し、電離圏を生成している。一方高温の太陽大気は、イオンと電子で構成されるプラズマの流れとなって吹き出し、周囲の宇宙空間を満たしている。このプラズマの流れは太陽風 (Solar wind) と呼ばれ、地球の磁場を有限の領域に閉じ込め磁気圏を形成している。

太陽-地球系の領域に対し、国際共同研究プログラムを組んで様々な物理現象の各過程に潜む謎を解明する国際磁気圏協同観測計画 ISTP (International Solar Terrestrial Physics)

が立ち上げられた。その目的の達成のために、宇宙航空研究開発機構（JAXA）、欧州宇宙機関（ESA）、米国航空宇宙局（NASA）、そしてロシア宇宙科学研究所（IKI）の4つの研究機関が、地球周辺に多数の科学衛星を打ち上げ、現在においても衛星ネットワークを構築している（1996年現在でISTPに関連している衛星はあけぼの衛星も含め25機）。その様子を図1に示す。

科学衛星による波動観測では電磁界の絶対強度を正確に測る技術が必要となってくる。磁気圏中での自然現象の多くは、その過程で粒子と波動との間でエネルギーの交換が行われるため、波動及び粒子のエネルギー、またその伝わり方を知ることが物理現象の過程を調べる上で重要となる。

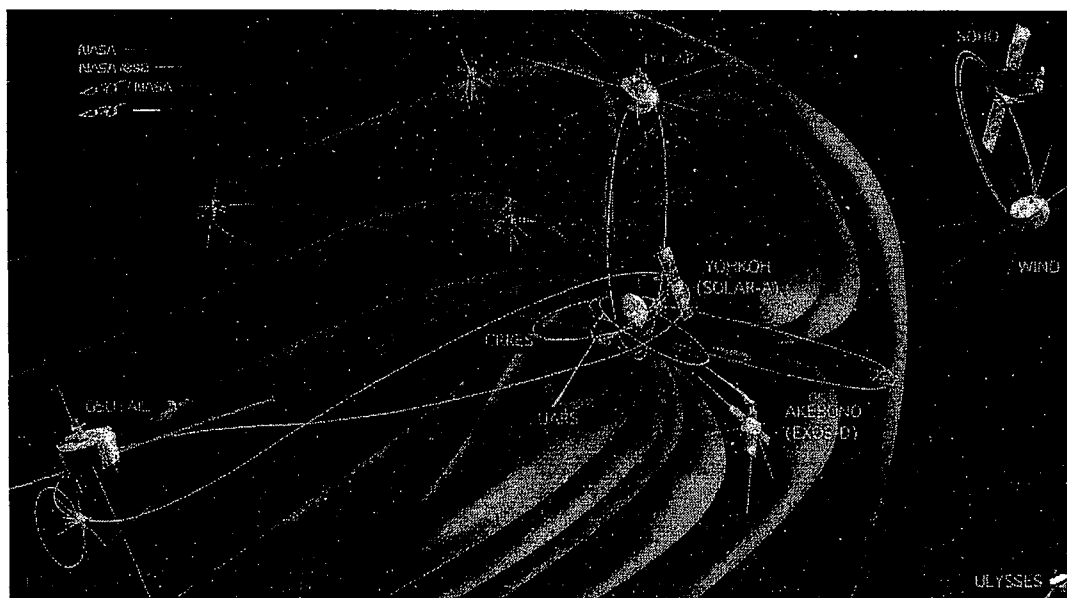


図 1: ISTP 計画に参加する衛星

科学衛星では電界観測用センサとしてワイヤアンテナ又はプローブアンテナが、用いられるが、磁化プラズマが異方性を示す誘電媒質であり、また周囲に形成されるシースの影響を受けるため、自由空間とはその特性が異なる。観測データから電界の絶対強度を校正によって得るためには、ワイヤアンテナやプローブアンテナの正確な実効長とインピーダンスが分かっている必要がないため、磁化プラズマ中における電界センサの特性を詳細に解析する必要がある。

本論文ではあけぼの衛星におけるワイヤアンテナの実効長の推定及びインピーダンスの測定結果の解析を行い、コールド磁化プラズマ中におけるワイヤアンテナの特性を明らかにすることを目的とする。

2 あけぼの衛星搭載 VLF 観測装置

図2に直交ダイポール型ワイヤアンテナ（WAT）、3軸直交空心ループアンテナ（LPA）、3軸直交サーチコイル（SC）の衛星上の配置を示す。

WATは4本のアンテナエレメント（WAT-1, WAT-2, WAT-3, WAT-4）で構成されている。各アンテナエレメントの長さは30 mで、先端の10 mが露出しており、他の部分は

絶縁体で覆われている。そして、図2のように衛星座標系 XYZ においてスピン軸を Z 軸として、反時計方向に 35° 回転した座標系に伸長されている。WAT-1とWAT-3、及びWAT-2とWAT-4の2組のアンテナで電界の直交2成分を観測する (Tip-to-tip 60 m)。

外部電界 E によるアンテナの端子間開放電圧 V (WAT-3から見たWAT-1の電圧) は次式のようになる。

$$V = -l_e \cdot E \quad (1)$$

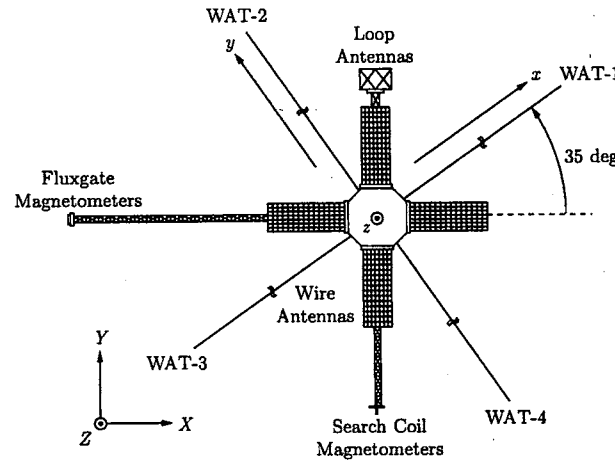


図 2: センサー配置図

ここで l_e は電界ワイヤアンテナの実効長である。

観測された電界の絶対強度を求めるためにはアンテナのインピーダンスとプリアンプの入力インピーダンスを考慮しなければならない。アンテナのインピーダンスは抵抗成分 R_a と容量成分 C_a の並列結合で表されるとされており、その測定はVIPで行われる。プリアンプの入力インピーダンスについて抵抗成分無限大と考えてよく、容量成分は打ち上げ前の地上試験で測定されており、約 100 pF である。以上を考慮すると、WAT-プリアンプ部の等価回路は図3のようになる。これより、プリアンプ出力電圧 e_0 は次式で与えられる。

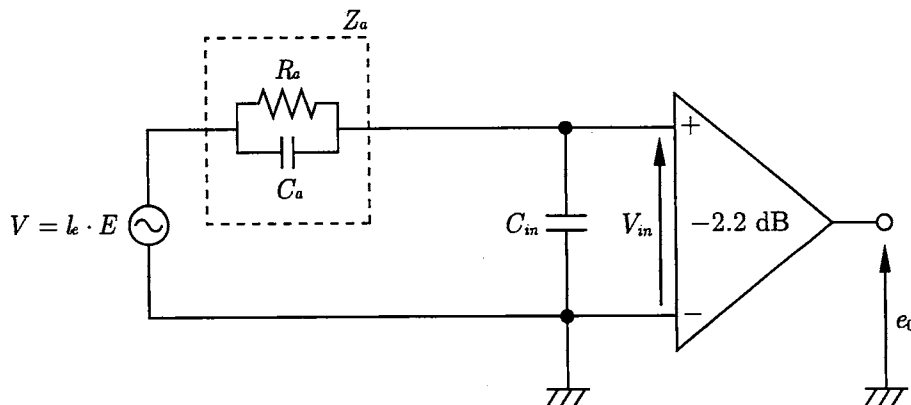


図 3: WAT-プリアンプの等価回路

$$e_0 = -\frac{\frac{1}{j\omega C_{in}}}{Z_a + \frac{1}{j\omega C_{in}}} l_e E \times 10^{-2.2/20} \quad (2)$$

ここで、 C_{in} はプリアンプ入力容量 (100 pF)、 Z_a はアンテナインピーダンスで、

$$Z_a = \frac{1}{\frac{1}{R_a} + j\omega C_a} \quad (3)$$

である。

VIP は観測機器の校正の為にキャリブレーション信号を発生して印加を行う CAL 機能と、電界の絶対強度を求める為に必要となる WAT のインピーダンスを測定する IMP 機能を持つ。図 4 にインピーダンス測定時における等価回路を示す。測定原理は、印加電圧によるアンテナ出力を印加電圧に対して 0 deg と 90 deg の位相差を持つ基準電圧で検波して、その直流分を測定するというものである。計測範囲を拡大する為に、アンテナの出力電圧が一定になるように印加電圧のレベルを自動的に制御しており、そのレベルも測定される。測定値は VIP のステータス情報と共に PCM 伝送されており、得られた各 1 Byte (0~255) の PCM データに変換を施すことによって、測定値に対応した値を得る。変換後の値から若干の計算によってアンテナインピーダンスを得る。

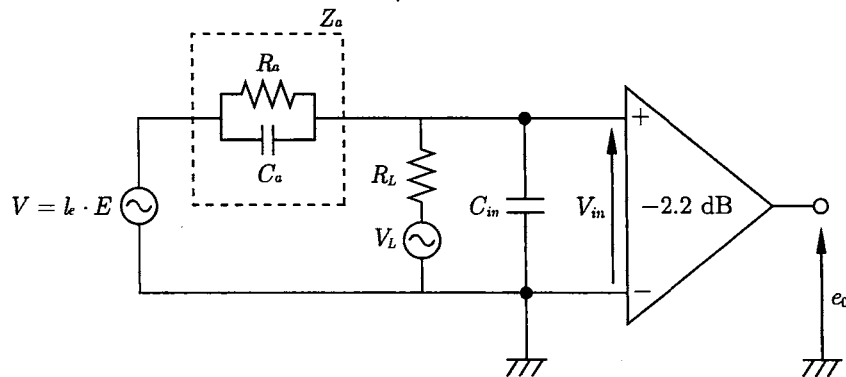


図 4: VIP 測定時の WAT-プリアンプの等価回路

3 実効長の推定

以下にワイヤアンテナの実効長の推定方法について述べる。磁界 H 、電流密度 J 、及び電界 E に関するマクスウェルの方程式

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (4)$$

において、プラズマの効果を

$$\mathbf{J} = \sum_i N_i q_i \mathbf{v}_i \quad (5)$$

とし、磁化コールドプラズマ中で H 及び E が $\exp\{j(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})\}$ で表される形で伝搬をしている時

$$-j\mathbf{k} \times \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} = j\omega\epsilon_0\epsilon_r\mathbf{E} \quad (6)$$

と表すことができ、これを E について解けば

$$\mathbf{E} = -cn\epsilon_r^{-1}(\mathbf{u}_k \times \mathbf{B}) \quad (7)$$

となる。ここで ϵ_0 及び μ_0 は真空の誘電率及び透磁率、 c は真空中での光速、 n は屈折率、 ϵ_r は比誘電率テンソル、 \mathbf{u}_k は波動の伝搬ベクトル \mathbf{k} の単位ベクトル、 \mathbf{B} は波動の磁束密度である。また式 (5) のプラズマの効果はプラズマ中の荷電粒子による電流を表していて、 N_i 、 q_i 、 v_i はそれぞれ i 番目の種類の粒子の密度、電荷、平均速度である。本研究では電子の影響だけを考え、他の粒子の影響は無視する。以上より、式 (7) における右辺のパラメータが決まれば、理論的に電界 E を求めることができる。

一般に電界 E を実効長 l_e のワイヤアンテナで観測したとき、アンテナ端子間に誘起される開放電圧 V は式 (1) で表されるが、あけぼの衛星で観測される電界 E は WAT 座標系 (x, y, z) を用いると E_x 、 E_y 、 E_z に分解され、それぞれ x 方向、及び y 方向のワイヤアンテナで観測される（あけぼの衛星では E_z は観測されない）。 x 方向、 y 方向のワイヤアンテナの実効長をそれぞれ l_{ex} 、 l_{ey} 、端子間に誘起された開放電圧をそれぞれ V_x 、 V_y とすると

$$\begin{cases} l_{ex} = -\frac{V_x}{E_x} \\ l_{ey} = -\frac{V_y}{E_y} \end{cases} \quad (8)$$

となり、式 (7) より理論的に計算した電界を WAT 座標系に変換したもの、及びあけぼの衛星でオメガ信号を観測したときの V_x 、 V_y を式 (8) に代入することで実効長を推定することができる。 x 方向、 y 方向それぞれのアンテナの端子間開放電圧 V_x 、 V_y が独立なデータであり、また式 (7) の電界もベクトルであるため、搭載されている 2 本のワイヤアンテナの実効長をそれぞれ独立に求めることができる。 V_x 、 V_y を求めるためには、アンテナインピーダンスを使って PFX の観測データを較正しなければならないが、ここでは過去に VIP の計測から得られた値 ($R_a = 500 \text{ k}\Omega$ 、 $C_a = 250 \text{ pF}$) を用いた。なお、前節で得られた電界は複素時系列データであるため、 V_x 及び V_y を複素時系列データに変換することで、 l_{ex} 及び l_{ey} も複素時系列データとして得られる。

あけぼの衛星で観測されたオメガ信号のうち、精度良く推定するために、安定して観測され各電磁界成分の SN 比が比較的良く、さらに観測された時間が長いものを選んだ。1994 年 2 月 1 日の観測データから計算した結果を図 5 に示す。横軸は地球磁場 B_0 と x 方向のアンテナとの成す角 ϕ_x 、地球磁場 B_0 と y 方向のアンテナとの成す角 ϕ_y とする。これより推定結果が衛星スピンの影響を受けて変動していることが分かる。

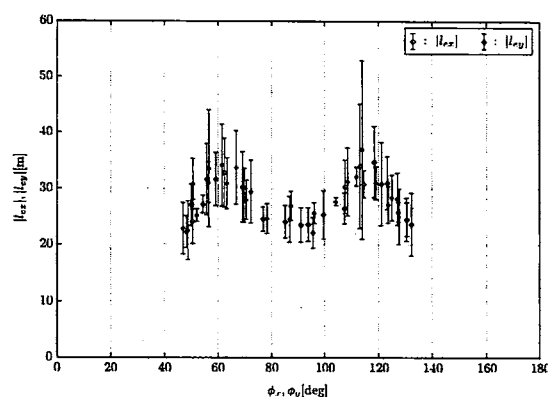


図 5: 実効長の計算結果と地球地場とアンテナの成す角の関係 (1994 年 2 月 1 日)

4 アンテナインピーダンス

自由空間中におけるアンテナのインピーダンスはその形状と周りの媒質によって決まるが、プラズマ中においてはアンテナ周りに形成されるシース及びプラズマとアンテナエレメントの電位差が密接に関連する。

前章の結果より、実効長の推定結果が衛星スピンの依存して変動していることが分かった。そこで、推定された実効長の変動がアンテナインピーダンスに換算してどの位変動しているかを調べた。図 6 に結果を示す。ここでは衛星スピンによる影響を見るため、アンテナと地

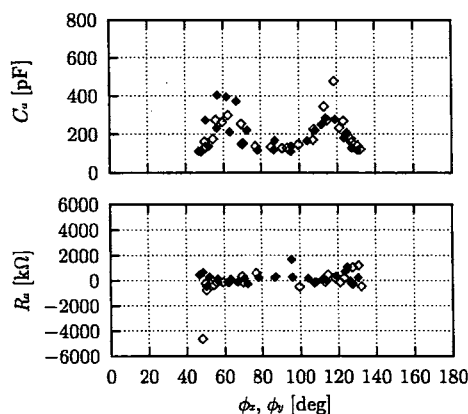


図 6: アンテナインピーダンスの推定結果 (1994 年 2 月 1 日)

球磁場の成す角を横軸とした。

本章ではベクトルインピーダンス測定器より得られた計測データから、ワイヤアンテナのインピーダンスを計算し、理論値と比較する。また、アンテナインピーダンスの衛星スピン依存性を調べる。VIP で得られたインピーダンスの測定値はアンテナの実効長とは無関係であるため、地球磁場やプラズマウェイクがインピーダンスに与える影響を実効長とは切り分けて調べることができる。

磁化プラズマ中のアンテナインピーダンスはシースによるインピーダンスが支配的であるとされており、理論値もよく一致する。インピーダンスがスピンの同期して変化しているとすれば、シースの形状、媒質定数が地球磁場の影響で変動している可能性や、プラズマウェイクによる電子密度分布や周囲の電位分布が変化している可能性が考えられる。

1989年8月23日にVIPで得られた計測結果を図7に示す。横軸をアンテナとあけぼの衛星の進行方向と成す角 ϕ_{Vs} 、及びアンテナと地球磁場との成す角 ϕ_{B_0} とした。この結果より

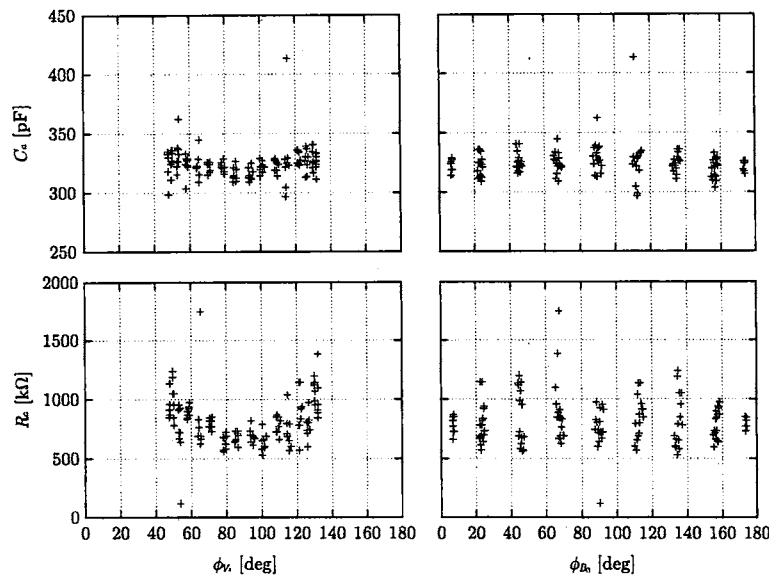


図 7: C_a 及び R_a の衛星スピン依存性 (1989年8月23日 00:49:57 UT)

R_a については強いスピン依存性が見られる。またキャパシタンス成分の理論値は 150~400 pF 程度であり、測定結果に一致する。

5 総括

本論文では科学衛星においてプラズマ波動の電界成分の正確な絶対強度を観測するため、あけぼの衛星に搭載されているワイヤアンテナの磁化プラズマ中における実効長とインピーダンスの解析を行った。

第2章では、実効長の推定及びインピーダンス計測に用いられるあけぼの衛星の観測装置について、その仕様と原理について紹介した。

第3章では、あけぼの衛星のワイヤアンテナの実効長の推定を行った。真空中では波長に比べてアンテナの長さが十分に短いとき、実効長は半分になる。しかし磁化プラズマ中におけるアンテナには周囲にシースが形成されるため、真空中の場合とは異なる可能性がある。推定方法としては観測されたオメガ信号の磁界3成分、電子密度、地球磁場より、磁化プラズマ中におけるマクスウェルの方程式により、理論的な電界成分を導き、アンテナ端子間に誘起された開放電圧との比をとるというものである。3例の観測データについて推定を行い、推定の結果、磁化プラズマ中における実効長が真空中における実効長とほぼ等しいことが分かった。しかし同時に衛星スピンに同期して変動している推定結果も得られた。GEOTAIL衛星においても同じの方法を用いて実効長の推定が行われており、その結果同様に衛星スピンの同期した変動が見られた。ただし GEOTAIL 衛星は、スピン角によってはアンテナが

衛星本体の影に入り、その結果光電子放出量が変化したことが原因であると考察された。あけぼの衛星については、ワイヤアンテナはスピン平面に設置されており、さらにスピン軸は常に太陽方向を向く姿勢を維持しているため、衛星スピンによって光電子放出量は変化しないと考えられる。衛星スピンによって変動すると考えられるものは実効長以外にインピーダンスが考えられるため、次章にてインピーダンスの計測結果について解析を行った。

第4章では、プラズマ中におけるデバイ遮蔽、アンテナインピーダンスの理論について述べ、前章で得られた結果の変動がインピーダンスに置き換えられるとどの位の変動か調べるために、実効長を30 mとして、インピーダンスのキャパシタンス成分及び抵抗成分の推定を行った。また、VIPによって得られた計測データよりアンテナインピーダンスのキャパシタンス成分及び抵抗成分を計算した。VIPはアンテナに対して交流電圧を印加することで、インピーダンスの計測を行うが、その周波数は100 Hzから12.75 kHzまでと17.8 kHzのうちから選ぶことができる。本章では前章の結果と比較するためにほぼ等しい周波数における測定結果について解析を行った。解析を行った3例のうち1例については、衛星の進行方向との依存性が見られた。このことからアンテナインピーダンスがプラズマウェイクによって変動している可能性があることが分かった。ただし、その変動幅はせいぜい30 pFで、推定したインピーダンスの変動幅に比べて小さいものであった。プラズマウェイクの影響が顕著に現れるのは、プラズマの流れが粒子の熱速度よりも大きいとき、または電子密度が大きいときである。あけぼの衛星の飛翔高度が低いときにインピーダンス計測を行えば、大きく変動した結果が得られる可能性があるが、低い高度において10 kHzの周波数でインピーダンス計測を行った例は見付からなかった。

得られた結果によれば、インピーダンスはプラズマウェイクの影響を受け変動することが明らかになった。また、実効長の推定結果にもその影響は受けるが、さらに大きな変動が他の要因によって実効長又はインピーダンスに起きていると言える。

学位論文審査結果の要旨

平成17年7月26日に第1回学位論文審査委員会を開催、8月1日に口頭発表、その後に第2回審査委員会を開催し、慎重審議の結果以下の通り判定した。なお、口頭発表における質疑を最終試験に代えるものとした。

地球周辺の宇宙空間(磁気圏・電離圏)における磁化プラズマ中では、地球磁場、プラズマ粒子及び低周波(～MHz以下)プラズマ波動の相互作用により、オーロラや磁気嵐などが発生する。その構造やエネルギーダイナミクスを定量的に知るためには、波動の電界成分の絶対値を測定することが重要となる。本論文は、1989年の打ち上げ以来現在も観測を継続している「あけぼの衛星」搭載の電界観測用ワイヤアンテナの特性を詳細に解析し、①プラズマ波動の観測結果と理論解析との比較によりアンテナ実効長を測定し、実効長が従来の仮定通りアンテナ全長(60m)の半分(30m)になることを明らかにした。また、②アンテナインピーダンスが衛星スピンの同期して変動することを明らかにし、その原因が地球磁場の方向、及び衛星進行方向の後ろに生じるプラズマウェイク(航跡)によりアンテナ周辺のプラズマ環境が局所的に変化することによる可能性を示した。以上の研究成果により、従来科学衛星観測において定量的に厳密ではなかった、低周波プラズマ波動の電界成分を精確に測定できるようになり、これは現在国際協力で進められている衛星観測による磁気圏・電離圏のダイナミクス解明に大きく貢献するものである。

以上の内容から、本論文は博士(工学)に値するものと判定した。